



⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der
europäischen Patentschrift

⑨ EP 0 532 288 B 1

⑩ DE 692 23 013 T 2

⑤ Int. Cl.⁶:
B 29 C 70/10
G 06 F 17/50

- ⑳ Deutsches Aktenzeichen: 692 23 013.0
㉑ Europäisches Aktenzeichen: 92 308 169.9
㉒ Europäischer Anmeldetag: 9. 9. 92
㉓ Erstveröffentlichung durch das EPA: 17. 3. 93
㉔ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 5. 11. 97
㉕ Veröffentlichungstag im Patentblatt: 12. 3. 98

- ③① Unionspriorität:
756719 09. 09. 91 US
- ③② Patentinhaber:
Exxon Research and Engineering Co., Florham
Park, N.J., US
- ③③ Vertreter:
Uexküll & Stolberg, 22607 Hamburg
- ③④ Benannte Vertragsstaaten:
BE, DE, FR, GB, IT, NL, SE

- ③⑤ Erfinder:
Anderson, Michael Paul, Gillette, New Jersey, US;
Monette, Liza Marie-Andree, Flemington, New
Jersey, US; Dismukes, John P., Annandale, New
Jersey, US; Ling, Shiun, Somerville, New Jersey,
US; Srolovitz, David Joseph, Ann Arbor, Michigan,
US

③⑥ Verbundwerkstoffe und Verfahren zu deren Herstellung

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 692 23 013 T 2

DE 692 23 013 T 2

B 30.10.97

EP 92308169.9

Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der Verbundmaterialien und betrifft insbesondere Verbundwerkstoffe, die Fasern als eine Phase eingebaut haben.

Definitionsgemäß schließen Verbundmaterialien zwei oder mehr Phasen mit unterschiedlichen physikalischen Charakteristika ein. Normalerweise sind die Phasen aus unterschiedlichen Materialien hergestellt. Viele Verbundwerkstoffe bauen Fasern, typischerweise aus einem relativ starren Material, in eine Matrix aus einem anderen Material ein, das normalerweise weniger starr ist. Beispielsweise werden Polymere oft mit Fasern aus Glas, Keramik oder Kohlenstoff verstärkt, wohingegen Metalle mit Keramikfasern verstärkt werden können.

Verbundwerkstoffe haben einzigartige Probleme, die mit gleichförmigen Einphasenmaterialien nicht beobachtet werden. Praktische Verfahren zur Herstellung von Verbundmaterialien und die Formung derselben zu den gewünschten Formen bringen Einschränkungen und Kompromisse mit sich. Es ist oft preisgünstiger, einen faserverstärkten Verbundwerkstoff unter Verwendung kürzerer Fasern und mit einem relativ niedrigen Verhältnis von Faservolumen zu Matrixvolumen herzustellen. Im Unterschied dazu verbessern sich die physikalischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs wie Zugfestigkeit und Zugmodul oft mit zunehmendem Faservolumen und insbesondere mit zunehmender Faserlänge. Die Konstruktion eines Verbundwerkstoffs beinhaltet oft das Finden eines Ausgleichs zwischen diesen konkurrierenden Überlegungen.

Es ist seit langem erkannt worden, daß die Länge der Faser den Grad beeinflußt, bis zu dem Belastungen wie Zugbelastungen durch die Faser im Gegensatz zu der umgebenden Matrix getragen werden. Dies kann illustriert werden, indem der Fall einer in einer umgebenden Matrix eingebetteten Faser betrachtet wird, wobei die Faser einen wesentlich höheren Dehnungsmodul als das umgebende Matrixmaterial hat, und die gesamte Baueinheit einer Zugbelastung in Richtung der Faser ausgesetzt wird. Da Belastungen nur durch das unmittelbar benachbarte Matrixmaterial auf die Faser übertragen werden können, ist die gesamte Zugkraft, die

auf die Faser ausgeübt wird, direkt mit der Belastung verknüpft, die der Bereich des Matrixmaterials trägt, der die Faser unmittelbar umgibt. Bei einer sehr kurzen Faser ist der Bereich des Matrixmaterials, der die Faser unmittelbar umgibt, relativ klein und somit ist die Belastung, die bei einer gegebenen Deformation des Matrixmaterials auf die Faser übertragen wird, auch relativ klein. Somit kann die an die Faser übertragende Menge der Belastung sehr klein sein, selbst wenn das Matrixmaterial bis zu seinem Bruchpunkt verformt worden ist. Im Gegensatz dazu gibt es bei einer sehr langen Faser einen wesentlichen Bereich des die Faser umgebenden Matrixmaterials und die Belastungsmenge, die je Einheit Deformation des Matrixmaterials auf die Faser übertragen wird, ist entsprechend groß. Daher wirken selbst bei relativ kleinen Deformationen des Matrixmaterials wesentliche Belastungen auf die Faser.

Bei sehr kurzen Fasern bleiben die Fasern ungebrochen, wenn der Verbundwerkstoff gebrochen ist, wohingegen bei sehr langen Fasern die Fasern gebrochen sind, bevor der Verbundwerkstoff bricht. Der Begriff "kritische Länge" wird üblicherweise zur Bezeichnung der Faserlänge verwendet, der die Grenze zwischen diesen beiden Typen des Bruchverhaltens bildet. Bei Faserlängen unter der kritischen Länge bricht das Matrixmaterial und läßt die Fasern intakt, wenn der Verbundwerkstoff bis zum Versagen beansprucht wird, wohingegen bei Faserlängen oberhalb der kritischen Länge die Fasern brechen, bevor das Matrixmaterial bricht. Die Länge einer Faser wird oft als ihr Aspektverhältnis ausgedrückt, d. h. das Verhältnis zwischen der Länge der Faser in ihrer Dehnungsrichtung und dem Durchmesser oder der größten Abmessung der Faser in einer Richtung senkrecht zu ihrer Dehnungsrichtung. Die kritische Länge kann als kritisches Aspektverhältnis angesehen werden.

Die kritische Länge und das kritische Aspektverhältnis hängen in hohem Maße von den physikalischen Eigenschaften des Fasermaterials und des Matrixmaterials ab. Im allgemeinen nimmt der Grad, bis zu dem die Festigkeit und andere Eigenschaften eines Verbundwerkstoffs durch Erhöhung der Faserlänge verbessert

werden kann, oberhalb der kritischen Länge ab. Wenn mit einem gegebenen Satz an Materialien gearbeitet wird, für die eine gegebene kritische Länge existiert, ist es oft ineffizient, Faserlängen zu verwenden, die weit über dieser gegebenen kritischen Länge liegen. Solche übermäßigen Faserlängen können zu Verarbeitungsproblemen führen, ohne entsprechend die in dem Verbundmaterial erreichten Eigenschaften zu verbessern. Es wäre daher erwünscht, das mit den verschiedenen Kombinationen von Fasern und Matrices assoziierte kritische Aspektverhältnis zu kennen. Kritische Längen können durch Herstellen und Testen von Probeverbundwerkstoffen herausgefunden worden, aber experimentelle Arbeit dieser Art ist zeitraubend und teuer. Es wäre auch wünschenswert, die Auswirkungen der variierenden Materialeigenschaften auf die kritische Länge in größerem Ausmaß zu verstehen.

Die japanische Patentanmeldung (Kokai) 53-125 447 beschreibt faserverstärkte Harzzusammensetzungen. Die Fasern sind hohl oder von unregelmäßigem Querschnitt mit einem Durchmesser von 0,05 mm oder mehr und sind aus einem linearen aromatischen Polyamidpolymer zusammengesetzt.

Ein Aspekt, der zu der vorliegenden Erfindung führt, berücksichtigt die Erkenntnis, daß im Stand der Technik akzeptierte Annahmen - daß das kritische Aspektverhältnis eine monotone Funktion des Elastizitätsmodulverhältnisses ist - nicht zutreffen. Gemäß diesem Aspekt ist nun gefunden worden, daß das kritische Aspektverhältnis (und somit die kritische Länge) eine Funktion des Elastizitätsmodulverhältnisses und des Verhältnisses zwischen der Kohäsionsenergie der Faser und der Kohäsionsenergie der Matrix ist, was hier als "Kohäsionsenergieverhältnis" bezeichnet wird. Somit gibt es für jedes gegebene Kohäsionsenergieverhältnis einen speziellen Bereich von Elastizitätsmodulverhältnissen, bei denen das kritische Aspektverhältnis am oder nahe dem Minimum ist. Materialien mit diesem kritischen Aspektverhältnis, die Kombinationen von Elastizitätsmodulverhältnis und Kohäsionsenergieverhältnis minimieren, repräsentieren einen optimalen Satz von Verbundwerkstoffen. Das Konzept, daß das kri-

tische Aspektverhältnis für diese speziellen Familien von Verbundwerkstoffen niedriger ist, ist in vielerlei Hinsicht von Bedeutung. Weil das kritische Aspektverhältnis für diese optimalen Faser- und Matrixkombinationen niedriger als für andere Faser- und Materialkombinationen ist, können kürzere Fasern verwendet werden, während dennoch das kritische Aspektverhältnis überschritten wird. Anders gesagt liefern Verbundwerkstoffe, die gemäß diesem Aspekt der Erfindung optimale Faser- und Matrixkombinationen einbauen, bessere Kompromisse zwischen physikalischen Eigenschaften und Verarbeitbarkeit als andere Kombinationen. Dieser Aspekt der Erfindung schließt außerdem die Erkenntnis ein, daß typische bisher verwendete Verbundwerkstoffe außerhalb dieser optimierten Bereiche gelegen haben.

Für Verbundwerkstoffe mit zweckmäßigen Kohäsionsenergieverhältnissen liegt der optimale Bereich des Elastizitätsmodulverhältnisses zwischen etwa 10 und etwa 20, vorzugsweise zwischen etwa 13 und etwa 18 und am meisten bevorzugt etwa 15. Eine bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung liefert Verbundwerkstoffe mit einem Elastizitätsmodulverhältnis innerhalb dieser bevorzugten Bereiche. Vorzugsweise schließen Verbundwerkstoffe gemäß diesem Aspekt ein im wesentlichen organisches Matrixmaterial wie ein Polymer oder eine Kombination von Polymeren ein und können polymere oder anorganische Fasern wie Glas oder Kohlefasern einschließen. Die intrinsischen physikalischen Eigenschaften von reinen organischen Polymeren und typischen Fasern würden normalerweise Elastizitätsmodulverhältnisse außerhalb dieser bevorzugten Bereiche liefern. Bevorzugte Verbundwerkstoffe gemäß diesem Aspekt der Erfindung schließen daher physikalische Mittel zum Modifizieren der Faser, der Matrix oder von beidem ein, um scheinbare physikalische Eigenschaften zu liefern, die von den intrinsischen Eigenschaften der reinen Materialien verschieden sind.

Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung liefert ein verbessertes Knotenmodell eines Verbundwerkstoffs, um kritische Aspektverhältnisse zu bestimmen. Dieses Modell schließt eine Vielzahl von einander beabstandeten imaginären Knoten ein, die

B 30 10 97

- 5 -

Punkte innerhalb mindestens einer Faser mit endlichem Aspektverhältnis wiedergeben, die sich in einer Dehnrichtung innerhalb einer die Faser umgebenden Matrix erstreckt. Der Begriff "imaginär" wird in Beziehung zu den Knoten des Modells verwendet, um auszudrücken, daß das Modell kein tatsächlicher Verbundwerkstoff, sondern in der Tat eine Darstellung eines Verbundwerkstoffs ist, wie eine rechnerbasierende mathematische Darstellung.

Das Modell schließt ferner Funktionen ein, die die mechanischen Eigenschaften der Faser und der Matrix als Wechselbeziehungen zwischen der Verschiebung von jedem solchen imaginären Knoten relativ zu jedem benachbarten Knoten und der in der Verformung zwischen diesen benachbarten Knoten gespeicherten Spannungsenergie wiedergeben. Das bedeutet, daß die Funktionen die relative Verschiebung von jedem Paar benachbarter Knoten mit Kräften verknüpfen, die zwischen diesen Knoten ausgeübt werden, d. h. mit Spannungsenergie. Typischerweise basieren Ausdrücke in jeder solcher Funktion mindestens teilweise auf mechanischen Eigenschaften der Materialien, die imaginär zwischen solchen Knoten vorhanden sind. Die Funktionen werden so gewählt, daß die Kräfte zwischen Knoten oder Spannungsenergien, die von den Funktionen vorhergesagt werden, Komponenten einschließen, die für die Scherspannungen in den Materialien repräsentativ sind. In einer besonders bevorzugten Anordnung können die Knoten in dreiwinkligem oder pyramidalem Gitter angeordnet sein und das Modell kann imaginäre Bindungen einschließen, die die am nächsten benachbart liegenden Punkte in diesem Gitter mit einem anderen Punkt verbinden. Die Funktionen können Gleichungen einschließen, die die Beziehung zwischen Kraft oder Spannungsenergie entlang jeder solcher Bindung und der Länge der Bindung definieren. Am meisten bevorzugt schließen die Funktionen auch Terme ein, die für Veränderungen der Winkel zwischen Bindungen repräsentativ sind.

Das Verfahren gemäß einem Aspekt dieser Erfindung schließt die Stufe ein, in der das Modell so arbeitet, daß mindestens eine Verformung auf das Modell wirkt, so daß das Modell anzeigt,

daß der Verbundwerkstoff unter dieser imaginären Belastung oder Verformung bricht. Brüche von individuellen Bindungen sowie Bruch des Verbundwerkstoffs als Ganzes werden aus Spannungsenergieüberlegungen bestimmt. Das Verfahren schließt wünschenswerterweise die Stufe ein, in der bestimmt wird, ob der Bruch des Verbundwerkstoffs den Bruch der Faser oder Bruch der Matrix beinhaltet, und dann wird die Arbeit mit dem Modell wiederholt, welches Fasern mit anderen Längen repräsentiert, bis das Modell Matrixbruch für Fasern mit mindestens einem ersten Aspektverhältnis und Faserbruch für Fasern mit mindestens einem zweiten Aspektverhältnis zeigt. Auf diese Weise sagt das Modell ein kritisches Aspektverhältnis voraus.

Verfahren gemäß diesem Aspekt der vorliegenden Erfindung schließen vorzugsweise außerdem die Stufen ein, in denen mindestens eine echte Faser und mindestens eine echte Matrix basierend mindestens teilweise auf den Ergebnissen, die aus der Arbeit des Modells erhalten wurden, ausgewählt werden. Die Faser und die Matrix werden wünschenswerterweise so gewählt, daß die echte Faser und die echte Matrix physikalische Eigenschaften haben, die im wesentlichen den physikalischen Eigenschaften entsprechen, die durch die Funktionen des Modells wiedergegeben werden. Vorzugsweise haben die echten Fasern ein Aspektverhältnis, das mindestens über dem von dem Modell vorhergesagten kritischen Aspektverhältnis liegt. Das Verfahren schließt auch die Stufe ein, in der echte Fasern und eine echte Matrix in einen Verbundwerkstoff eingebaut werden.

Verfahren gemäß diesem Aspekt der vorliegenden Erfindung können außerdem die Stufe einschließen, in der die Arbeit des Modells in aufeinanderfolgenden Vorgängen wiederholt wird, während mindestens ein Parameter in den Modellfunktionen variiert wird, der eine physikalische Eigenschaft in dem Modell definiert, so daß das Modell das kritische Aspektverhältnis für eine Vielzahl von Faser- und Matrixkombinationen mit unterschiedlichen Werten des mindestens einen Parameters vorhersagt, der in den aufeinanderfolgenden Vorgängen variiert wurde. Die Stufe der Bereitstellung der echten Fasern und der echten Matrix schließt

wünschenswerterweise die echte Faser und die echte Matrix ein, so daß ihre echten mechanischen Eigenschaften sich mindestens einem der Sätze von mechanischen Eigenschaften annähern, die in den wiederholten Arbeitsgängen des Modells verwendet wurden, wobei die Fasern ein Aspektverhältnis haben, das mindestens gleich dem kritischen Aspektverhältnis ist, das von dem Modell für diesen Satz von mechanischen Eigenschaften vorhergesagt wurde. Am meisten bevorzugt schließt ein Verfahren gemäß diesem Aspekt der vorliegenden Erfindung die Stufe ein, in der aus mehreren Sätzen von mechanischen Eigenschaften, die in verschiedenen Arbeitsgängen des Modells verwendet wurden, ein optimierter Satz von mechanischen Eigenschaften ausgewählt wird, für die das kritische Aspektverhältnis ein Minimum ist. Das heißt, daß die in dem echten Verbundwerkstoff verwendeten scheinbaren mechanischen Eigenschaften von Faser und Matrix solche mechanischen Eigenschaften wiedergeben, für die das Modell vorhersagt, daß das kritische Aspektverhältnis in Hinsicht auf mindestens einen der in dem Modell verwendeten Parameter am oder nahe dem Minimum ist. Die in dem Modell verwendeten Parameter schließen das Elastizitätsmodulverhältnis der Faser und der Matrix, d. h. das Verhältnis von dem Elastizitätsmodul der Faser zu dem Elastizitätsmodul der Matrix ein und schließen auch das Kohäsionsenergieverhältnis von der Faser und der Matrix ein, d. h. das Verhältnis von der Kohäsionsenergie der Faser zu der Kohäsionsenergie der Matrix.

Die vorliegende Erfindung liefert ein Verfahren zur Herstellung eines Verbundmaterials nach Anspruch 1.

Die vorliegende Erfindung liefert auch einen faserverstärkten Verbundwerkstoff gemäß Anspruch 4, der Fasern und eine Matrix einschließt, die aus einem Fasermaterial und einem Matrixmaterial gebildet sind, die jeweils intrinsische physikalische Eigenschaften aufweisen. Es sei darauf hingewiesen, daß die intrinsischen physikalischen Eigenschaften des Fasermaterials und des Matrixmaterials ein intrinsisches kritisches Aspektverhältnis des Knotenmodells definieren. Das heißt, das genannte Modell würde ein spezielles kritisches Aspektverhältnis für einen Verbundwerkstoff voraussagen, in dem die Faser und die Matrix phy-

sikalische Eigenschaften haben, die gleich den intrinsischen physikalischen Eigenschaften der Materialien sind, was hier als das intrinsische kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells bezeichnet wird. In einem Verbundwerkstoff gemäß diesem Aspekt der vorliegenden Erfindung bauen mindestens eines aus dem Matrixmaterial und den Fasern physikalische Mittel zum Modifizieren seines scheinbaren Elastizitätsmoduls oder seiner scheinbaren Kohäsionsenergie oder von beidem ein, so daß die scheinbaren physikalischen Eigenschaften der Fasern und/oder der Matrix sich von den intrinsischen physikalischen Eigenschaften der Materialien selbst unterscheiden. Die scheinbaren physikalischen Eigenschaften der Fasern und der Matrix sind so, daß die scheinbaren physikalischen Eigenschaften ein kritisches Aspektverhältnis definieren, das niedriger als das genannte intrinsische kritische Aspektverhältnis ist. Anders betrachtet, wenn die scheinbaren physikalischen Eigenschaften von den Fasern und/oder der Matrix in dem Knotenmodell verwendet würden, wäre das resultierende kritische Aspektverhältnis - hier als das scheinbare kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells bezeichnet - niedriger als das genannte intrinsische kritische Aspektverhältnis. Wie weiter nachfolgend diskutiert können die zum Modifizieren der scheinbaren physikalischen Eigenschaften der Faser verwendeten physikalischen Mittel Abweichungen von einer einfachen, geraden, gleichförmigen Fasergestalt und/oder in die Faser selbst eingebaute Füllstoffe beinhalten, wohingegen die zum Modifizieren der physikalischen Eigenschaften der Matrix verwendeten physikalischen Mittel Füllstoffe oder Hohlräume in der Matrix einschließen können. Jeder dieser Füllstoffe oder Hohlräume in der Faser oder der Matrix ist wünschenswerterweise von einer sehr geringen Größe (Mikrogröße), d. h. einer Größe, die kleiner als die Faser oder Matrix ist. In einer Variante dieses Ansatzes können die intrinsischen und scheinbaren kritischen Aspektverhältnisse solche sein, die mit den bezüglichen genannten analytischen Gleichungen definiert sind.

Materialien gemäß diesen Aspekten der vorliegenden Erfindung schließen Merkmale ein, die sie näher an die genannten op-

timierten Familien von Verbundwerkstoffen bringen, als sie ansonsten sein würden. In dieser Hinsicht ist, obwohl man bestimmen kann, ob ein Material gemäß diesem Aspekt der Erfindung ist oder nicht, indem die genannten intrinsischen und scheinbaren kritischen Aspektverhältnisse unter Verwendung des Modellansatzes oder des analytischen Gleichungsansatzes bestimmt werden, eine solche Bestimmung nicht immer notwendig, um das Material selbst herzustellen.

Diese Aspekte der Erfindung können mit gutem Nutzen mit verschiedenen Verbundwerkstoffen einschließlich unidirektionaler diskontinuierlicher Verbundwerkstoffe, d. h. Verbundwerkstoffe, in denen sich die Fasern im wesentlichen parallel zueinander erstrecken, eingesetzt werden. Obwohl diese Aspekte der vorliegenden Erfindung auf Verbundwerkstoffe angewendet werden können, die aus im wesentlichen beliebigen Faser- und Matrixmaterialien hergestellt sind, sind sie besonders brauchbar im Fall von Verbundwerkstoffen, die ein im wesentlichen organisches Matrixmaterial einbauen, d. h. ein Material, in dem der größere Anteil der Matrix ein organisches Material wie ein wärmehärtendes oder thermoplastisches Polymer ist. Bevorzugte Fasermaterialien schließen organische polymere Materialien wie Polyether, Polyolefine und Aramide, Metallmaterialien und nichtmetallische anorganische Materialien wie Glas oder Kohlefasern ein.

Bevorzugte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen definiert.

Diese und andere Aufgaben, Merkmale und Vorzüge der vorliegenden Erfindung werden aus der folgenden detaillierten Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen zusammen mit den angefügten Zeichnungen deutlich.

Figur 1 ist eine diagrammartige Schnittansicht eines Verbundwerkstoffs.

Figur 2 ist eine diagrammartige Ansicht von idealisierten Verbundwerkstoffen, die Versagensmodi abbilden.

Figur 3 ist eine graphische Darstellung, die bestimmte Beziehungen zeigt, die in einigen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwendet werden.

Figur 4 ist ein Diagramm, das Anteile eines Modells abbildet, das in anderen Ausführungsformen der Erfindung verwendet wird.

Figur 5 ist ein Betriebsfließschema für das Modell von Figur 4.

Figur 6 ist eine graphische Darstellung, die andere Beziehungen zeigt, die gemäß bestimmten Ausführungsformen der Erfindung verwendet werden.

Figur 7 ist eine Ansicht ähnlich Figur 1, die jedoch einen Verbundwerkstoff gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung abbildet.

Unter Bezugnahme auf Figur 1 schließt ein faserverstärkter Verbundwerkstoff in einer Matrix 12 dispergierte Fasern 10 ein. Die Fasern sind längliche Körper mit der Länge L und dem Durchmesser d . Normalerweise haben alle der Fasern in einem Verbundwerkstoff mindestens theoretisch die gleiche Länge L . In echten Verbundwerkstoffen gibt es jedoch Variationen der Faserlängen. Wenn demnach auf die Länge der Faser in einem echten Multifaserverbundwerkstoff in dieser Offenbarung Bezug genommen wird, soll die Bezugnahme als Bezug auf die wahrscheinlichste Länge der Fasern des Verbundwerkstoffs genommen werden, was normalerweise der Medianwert der Faserlänge ist. Mit dem Begriff "Durchmesser", wie unter Bezugnahme auf eine individuelle Faser in einem Verbundwerkstoff verwendet, ist auch der Mittelwert der äußeren Abmessungen der Faser in Richtungen senkrecht zu der Dehnungsrichtung der Faser gemeint. Am häufigsten liegen in Verbundwerkstoffen verwendete Fasern im wesentlichen in Form von kreisförmigen Zylindern vor und in diesem Fall ist der Durchmesser wie hier definiert einfach der Durchmesser, wie üblicherweise in Bezug auf einen Kreiszyylinder gemeint ist. Wie im Fall der Länge sollen Bezugnahmen auf den Durchmesser von Fasern in einem echten Multifaserverbundwerkstoff als Bezug auf den wahrscheinlichsten Faserdurchmesser der verschiedenen Fasern in dem Verbundwerkstoff verstanden werden. Die Fasern 10 des Verbundwerkstoffs in Figur 1 haben ein tatsächliches Aspektverhältnis S_{act} . Wie in dieser Offenbarung in bezug auf die Fasern in einem echten Ver-

bundwerkstoff verwendet ist das Aspektverhältnis S_{act} der Fasern das Verhältnis von Länge zu Durchmesser, d. h. S_{act} ist gleich L/d .

Der in Figur 1 illustrierte Verbundwerkstoff ist ein "unidirektionaler" Verbundwerkstoff, d. h. die Fasern erstrecken sich im allgemeinen parallel zueinander. Der Verbundwerkstoff aus Figur 1 ist auch ein "diskontinuierlicher" Faserverbundwerkstoff. Das bedeutet, daß die Fasern endliche Längen und somit endliche Aspektverhältnisse aufweisen. Typischerweise sind die Längen der individuellen Fasern in einem diskontinuierlichen Verbundwerkstoff erheblich niedriger als die Außenabmessungen des gesamten Verbundwerkstoffs in Richtung der Dehnung der Fasern.

Das Ausmaß, bis zu dem auf den Verbundwerkstoff wirkende strukturelle Belastungen von den Fasern 10 im Gegensatz zu der Matrix 12 aufgenommen werden, variiert mit den physikalischen Eigenschaften der Matrix und der Fasern und mit der Länge der Fasern. Wie oben diskutiert gibt es für jede spezielle Kombination von Matrix und Faser eine kritische Länge L_c , so daß, wenn eine Zugbelastung auf den Verbundwerkstoff in Richtung der Fasern wirkt, sowohl Faser als auch Matrix gleichzeitig brechen. Bei Faserlängen unter der kritischen Länge bricht die Matrix zuerst, wohingegen bei Faserlängen über L_c zuerst die Faser bricht.

Am Bruch eines Verbundwerkstoffs beteiligte Phänomene sind schematisch in Figur 2 dargestellt, die zwei Einzelfaserverbundwerkstoffe zeigt. Der Verbundwerkstoff in den Darstellungen A, B und C hat eine in Matrix 16 eingebettete Faser 14, die Faser hat eine Länge, die unter der kritischen Länge für diese Faser- und-Matrix-Kombination liegt. Darstellung A zeigt den Verbundwerkstoff ohne Last. Darstellung B zeigt den gleichen Verbundwerkstoff unter einer Zugbelastung unter der Bruchbelastung des Verbundwerkstoffs. Da der Zugmodul E_f der Faser 14 größer als der Zugmodul E_m der Matrix 16 ist, ist die Faser steifer als die Matrix. Daher neigt die Matrix zu einer stärkeren Deformation als die Faser. Anders betrachtet wird die Deformation der Matrix in gewissem Ausmaß durch Kräfte zurückgehalten, die zwischen der

Faser und der Matrix übertragen werden. Diese zwischen der Matrix und der Faser übertragenen Kräfte setzen die Faser unter Spannung. Diese Kräfte sind durch die Deformation der Matrix und durch den relativ niedrigen Elastizitätsmodul der Matrix begrenzt. An den Enden der Faser gibt es eine Spannungskonzentration. Die in diesem Bereich zwischen der Matrix und der Faser übertragenen Spannungen sind extrem hoch und daher gibt es eine Zone des lokalen Matrixversagens 18 an jedem Ende der Faser. Wenn die Last auf dem Verbundwerkstoff in progressiver Weise zunimmt, nehmen die zwischen der Matrix und der Faser übertragenen Kräfte zu, wie auch die konzentrierten Spannungen an den Enden der Faser. Die auf die Faser übertragenen Kräfte und somit die Zugspannung in der Faser nehmen nur zu einem relativ geringen Grad zu, wenn die Last auf dem Verbundwerkstoff zunimmt und die Matrix deformiert wird. Daher erreichen die konzentrierten Belastungen an den Bereichen 18 der Matrix nahe den Enden der Fasern die Bruchhöhe und die Matrix bricht katastrophal, wie in 20 dargestellt, bevor die Faser 14 bricht.

Die unteren Darstellungen D, E und F zeigen eine ähnliche Matrix 16' und Faser 14', wobei Faser 14' erheblich länger als Faser 14 ist. Ähnliche Phänomene treten auf, wenn in progressiver Weise zunehmende Belastungen einwirken. So wirken konzentrierte Belastungen auf die Bereiche 18' der Matrix an den Enden der Faser 14', wohingegen Faser 14' durch die von der Matrix übertragenen Belastungen unter Zugspannung gesetzt wird. Da jedoch Faser 14' relativ lang ist, sind die Zugbelastungen für die Faser relativ groß, verglichen mit den konzentrierten Belastungen auf der Matrix, so daß Faser 14' ihre Bruchbelastung erreicht, bevor das katastrophale Versagen der Matrix in den Bereichen 18' auftritt (Darstellung F).

Der Begriff "kritische Länge" bezieht sich auf eine spezielle Faserlänge L_c , so daß Fasern mit einer Länge L unter L_c das Matrixbruchverhalten (Darstellung C) zeigen, wohingegen Fasern mit einer Länge L größer als L_c das Faserbruchverhalten zeigen (Darstellung F). In ähnlicher Weise ist bei Fasern mit einem Aspektverhältnis S_{acc} kleiner als S_c , das kritische Aspektverhältnis

nis, das Verhalten des alleinigen Brechens der Matrix vorherrschend. Bei Fasern mit S_{acc} größer als S_c ist das Faserbruchverhalten vorherrschend.

Das kritische Aspektverhältnis eines Verbundwerkstoffs kann durch ein Knotenmodell bestimmt werden. Ein Knotenmodell wie hier verwendet ist eine Darstellung, die entweder ein physikalisches Strukturmodell oder bevorzugt ein mathematisches Modell sein kann, das in einem analogen oder vorzugsweise einem digitalen Computer implementiert ist. Die angenommene Geometrie eines Modells gemäß diesem Aspekt der Erfindung ist in Figur 4 schematisch dargestellt. Das Modell schließt eine Vielzahl von Knoten 30 ein, die durch eine Vielzahl von Bindungen 32 verbunden sind. Knoten 30 und Bindungen 32 sind imaginär, d. h. Merkmale des Modells, die nicht in physikalischer Form existieren müssen, sondern nur in der Form der in dem Modell verwendeten Darstellung. Knoten 30a stellen Punkte in einer Matrix dar, während Knoten 30b Punkte in einer Faser wiedergeben. Bindungen 32 geben Bindungen zwischen Knoten 30 als Beziehungen zwischen relativer Verschiebung der Punkte wieder, die durch die Knoten und Kräfte dargestellt sind, die entlang der Länge der Linie zwischen diesen Punkten wirken. Die Bindungen zwischen jedem Knoten und seinem nächsten Nachbarn geben so die mechanischen Eigenschaften der Faser und der Matrix als Wechselwirkungsbeziehungen zwischen der Verschiebung von jedem Knoten relativ zu seinem benachbarten Knoten und Kräfte zwischen diesen Knoten wieder. In dem speziellen in Figur 4 gezeigten Schema wird die Faser als Körper mit dem Einheitsdurchmesser im Modell dargestellt, d. h. es gibt nur eine Reihe von Knoten 30b, die die Faser darstellen, wohingegen die verbleibenden Knoten die Matrix wiedergeben. Dieses spezielle in Figur 4 illustrierte Modell ist auch ein zweidimensionales Modell. Somit wird, obwohl die echte physikalische Faser ein dreidimensionaler Körper ist, sie in dem mathematischen Modell in zwei Dimensionen durch nur eine einzige Schicht von Knoten wiedergegeben. Anders gesagt schließt das mathematische Modell keine Knoten ein, die unter oder über die Ebene der Zeichnung in Figur 4 verschoben werden.

Bindungen 32 werden in dem Modell als Zugfedern mit Federkonstanten behandelt, die zu dem Zugmodul des speziellen Materials proportional sind, das entlang der Längsachse der Bindung vorhanden ist. Somit wird jede Bindung 32a, die die Knoten 30a innerhalb der Matrix verbindet oder einen Knoten 30a der Matrix mit einem Knoten 30b der Faser verbindet, als Feder mit einer Federkonstante proportional zu dem Elastizitätsmodul der Matrix behandelt, wohingegen Bindungen 32b, die sich von einem Faserknoten 30b zu einem anderen Faserknoten 30b erstrecken, als eine Federkonstante proportional zu dem Elastizitätsmodul der Faser aufweisend behandelt werden. Anders betrachtet wird die entlang jeder Bindung zwischen 32a gerichtete Kraft als gleich $E_m(r-r_0)$ genommen, wobei r die Länge einer solchen Bindung unter den in Frage kommenden Bedingungen wiedergibt und r_0 die Länge der Bindung unter den Ausgangsbedingungen oder spannungsfreien Bedingungen wiedergibt. In ähnlicher Weise wird für jede Bindung 32b die Kraft entlang der Bindung als gleich $E_f(r-r_0)$ genommen.

Um zusätzlich die Scherbeständigkeit des Matrixmaterials wiederzugeben, kann das Modell Torsions- oder "Dreikörper"-Komponenten einschließen. Diese Torsionskomponenten können als Torsionsfedern wiedergebend angesehen werden, die zwischen jedem Paar von sich schneidenden Bindungen 32 verbindend angeordnet sind. Die Deformation von jeder solcher Torsionsfedern wird als proportional zu der Veränderung in dem Winkel θ zwischen jedem Paar von sich schneidenden Bindungen genommen, wohingegen die Torsionsfederkonstante als ein Siebtel des Elastizitätsmoduls E_m des Matrixmaterials angenommen wird. Das bedeutet, daß angenommen wird, daß die Scherbeständigkeit sich nur auf die Scherung des Matrixmaterials bezieht und es wird außerdem angenommen, daß das Matrixmaterial ein Poisson-Verhältnis von 0,1 hat. In dieser Hinsicht haben Polymermatrizes allgemein ein Poisson-Verhältnis oder ν_m von etwa 0,3, wohingegen das Poisson-Verhältnis oder ν_f von echten Glasfasern typischerweise etwa 0,2 beträgt. Weil jedoch das Modell nur eine einzige Reihe von Knoten zur Darstellung der Faser verwendet, wird implizit angenommen, daß ν_f gleich Null ist. Demnach erhält die Annahme, daß ν_m gleich 0,1 ist, die

realistische Beziehung $v_m - v_f = 0,1$. Somit ist die Torsion gegeben durch $c(\theta - \theta_0)$ für jedes Paar von sich schneidenden Bindungen, wobei θ den Winkel zwischen den sich schneidenden Bindungen wiedergibt, θ_0 den Winkel zwischen den gleichen Bindungen im spannungsfreien Zustand (Spannung=0) wiedergibt, und $c = E_m/10$. Wie erkannt wird, bildet jede Bindung 32 einen Teil von mehreren solchen Schnittpunkten und bildet somit einen Teil von mehreren solchen imaginären Torsionsfedern. Somit bildet Bindung 32a₁ einen Teil von vier Winkeln θ_A , θ_B , θ_C und θ_D . Jeder dieser imaginären Winkel θ ist ein "Dreikörper"-Ausdruck, da er die Funktion der Positionen von drei Knoten ist. Beispielsweise ist θ_A in Figur 4 eine Funktion der Positionen der Knoten 30a₁, 30b₁ und 30b₂.

Die gesamte Spannungsenergie in dem System ist gegeben durch

$$H = \frac{1}{2} E_a \sum_{ij} (r_{ij} - r_0)^2 + \frac{1}{2} c \sum_{ijk} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2 \quad (XI)$$

in der i, j alle der verschiedenen Bindungen bezeichnen; i, j, k alle der Winkel bezeichnen; r die Bindungslänge oder den Abstand r zwischen jedem Paar von benachbarten Knoten i und j wiedergibt; E_a den Elastizitätsmodul der Matrix E_m für i, j , die eine Matrixbindung 32a bezeichnen, wiedergibt; wobei E_f der Elastizitätsmodul der Faser, E_f für i, j , die eine Faserbindung 32b bezeichnen, ist; r_0 die Ausgangslänge der verschiedenen Bindungen wiedergibt, wobei alle als gleich angenommen werden; θ_{ijk} einen beliebigen der Bindungswinkel wiedergibt, θ_0 den Ausgangswert dieses Winkels wiedergibt, der mit 60° angenommen wird, und c die genannte Torsionsfederkonstante wiedergibt; d. h. $E_m/10$.

In diesem Modell wird die mit jeder individuellen Bindung assoziierte Energie als

$$h_{\text{Bindung}} = \frac{1}{2} E_a (r - r_0)^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} c \sum_{ijk-\text{Nachbarn}} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2 \right] \quad (\text{XII})$$

genommen, wobei h_{Bindung} die Energie der speziellen in Frage kommenden Bindung ist. Der Ausdruck $ijk = \text{Nachbarn}$ zeigt, daß die Aufsummierung über solche Winkel θ erfolgt, die der in Frage kommenden Bindung benachbart sind, d. h. jene Winkel zwischen der in Frage kommenden Bindung und einer anderen Bindung. Beispielsweise würde in Hinsicht auf Bindung 32a, in Figur 4 die Summe Terme für θ_A , θ_B , θ_C und θ_D einschließen. Nur die Hälfte der mit jedem solcher benachbarten Winkel verbundenen Energie wird der in Frage kommenden Bindung in der vorherigen Formel zugeordnet. Somit wird die Energie h_{Bindung} einer speziellen Bindung so genommen, daß sie die gesamte mit der Dehnung dieser Bindung assoziierte Energie und die Hälfte der mit der Deformation jedes benachbarten Winkels assoziierte Energie einschließt.

Das Modell arbeitet gemäß dem in Figur 5 gezeigten allgemeinen Schema. Die in jedem speziellen Durchlauf des Modells bewertete Faserlänge ist implizit in der Charakterisierung von speziellen Knoten als Teil der Faser oder Teil der Matrix. Beispielsweise kann das Modell so gemacht werden, daß es eine kürzere Faserlänge simuliert, indem angenommen wird, daß Knoten 30b, in der Matrix anstatt in der Faser enthalten ist, und indem einige der Charakteristika der assoziierten Bindungen demgemäß eingestellt werden. Die Eigenschaften von Matrix- und Fasermaterial spiegeln sich in den angenommenen Werte für E_s und E_f und in den Werten für die Kohäsionsenergien der Faser und Matrix, U_f und U_m wieder, die auch angenommen sind. Wenn diese Annahmen gegeben sind, wird das Modell durch die illustrierten Arbeitsschritte 5 geführt. Zu Beginn des Vorgangs wird angenommen, daß die Modellstruktur bis zu einem willkürlich gewählten Ausmaß deformiert wird. Unter Verwendung der Visualisierung in Figur 4 würde dies zu einer Annahme führen, daß die Knoten 30a₄, 30a₅ und 30a₆ an ihrer Stelle verbleiben, wohingegen die Knoten 30a₇, 30a₈ und 30a₉ nach rechts in Richtung x oder in Faserachsenrichtung um den

Betrag, der der willkürlich gewählten Deformation entspricht, verschoben werden.

In dem nächsten Schritt des Vorgangs werden die Positionen von allen anderen Knoten so gewählt, daß sie die niedrigste Gesamtspannungsenergie H gemäß der Formel XI liefern. Das heißt, aus einer Gesamtheit, die aus allen möglichen Sätzen von Knotenpositionen r in der x - und y -Richtung (Querachse) besteht, die mit der angenommenen Deformation übereinstimmen und somit mit der angenommenen Position der Knoten 30a₁ bis 30a₅ und 30a₆ bis 30a₁₀ übereinstimmen, wird der spezielle Satz von Knotenpositionen herausgefunden, für die H an einem Minimum ist.

Es sei darauf hingewiesen, daß der Wert für r und θ für jede Bindung und jeden Winkel in dem Modell in unverwechselbarer Weise für jeden Satz von Knotenpositionen bestimmt wird und somit der Wert von H für jeden möglichen Satz von Knotenpositionen in der x - und y -Richtung gemäß Formel XII berechenbar ist. Anders betrachtet ist H eine abhängige Variable, die eine Funktion von all den Positionen ist, die unabhängige Variablen spezifizieren, d. h. dem x - und y -Positions Wert für die gesamten Knoten. Somit ist das Problem der Auswahl der x - und y -Werte, die den niedrigsten H -Wert ergeben, einfach das Problem des Herausfindens der Werte für mehrere unabhängige Variablen, die mit einem Minimumwert für eine Funktion jener unabhängigen Variablen assoziiert sind. Mathematische Techniken zum Herausfinden des Minimums einer Funktion von mehreren unabhängigen Variablen und Herausfinden der Werte der unabhängigen Variablen, die mit dem Minimum assoziiert sind, sind wohlbekannt. Diese werden auch als "Minimierungstechniken" bezeichnet. Jede dieser bekannten Techniken kann verwendet werden. Im allgemeinen beinhalten diese Techniken Iteration oder Versuch und Irrtum, d. h. das Ausprobieren verschiedener Sätze der unabhängigen Variablen, bis der spezielle Satz, der das Minimum ergibt, gefunden ist. Die zu probierenden Sätze können gemäß einem beliebigen der zahlreichen bekannten mathematischen Algorithmen gewählt sein. Geeignete Algorithmen zum Herausfinden der Minima sind in dem Text Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing, von Press et al., Cam-

bridge University Press, 1986, und insbesondere in Kapitel 10 dieses Textes offenbart, der Minimierung oder Maximierung von Funktionen betrifft. Auf die Offenbarung dieses Kapitels wird hier Bezug genommen.

Minimierungsverfahren arbeiten im mehrdimensionalen Raum, der durch die mehreren unabhängigen Variablen definiert ist, und gehen so vor, daß eine Reihe von "Linienminimierungen" durchgeführt werden, d. h. indem eine spezielle Linie in diesem mehrdimensionalen Raum gewählt wird und sich entlang dieser Linie bewegt wird, bis mindestens ein lokales Minimum gefunden ist. Sogenannte Gradientenverfahren verwenden den Gradienten der Funktion, d. h. den Vektor, der aus den ersten partiellen Ableitungen der Funktion im mehrdimensionalen Raum zusammengesetzt ist, als Richtlinie zur Auswahl der Richtungen der verschiedenen Linien, die für diese Linienminimierungen verwendet werden. Das sogenannte Verfahren der "steilsten Abnahme" führt eine Linienminimierung in einer willkürlichen Richtung durch und führt dann eine weitere Linienminimierung entlang einer Linie in der Richtung des Gradienten an diesem lokalen Minimum durch, um so noch ein weiteres lokales Minimum zu finden, und wiederholt dieses Verfahren wieder und wieder. Obwohl ein solcher Algorithmus schließlich am wahren oder globalen Minimum konvergiert, ist er im allgemeinen weniger bevorzugt, weil er relativ langsam ist. Eine bessere, bevorzugtere Minimierungstechnik wird als die konjugierte Gradientenmethode bezeichnet. Bei der konjugierten Gradientenmethode werden aufeinanderfolgende Linienminimierungen entlang einer Reihe von Richtungen durchgeführt, die so gewählt werden, daß die aufeinanderfolgenden Richtungen konjugiert zueinander sind. Das heißt, daß das Produkt eines Vektors in einer solchen Richtung und einer speziellen Matrix, die als "Hesse'sche Matrix" bezeichnet wird, einen Vektor ergeben, der multipliziert mit dem nächsten darauffolgenden Vektor gleich Null ist, und jeder dieser Richtungsvektoren passiert das lokale Minimum entlang der Linie in der unmittelbar vorhergehenden Vektorrichtung. Spezifische Algorithmen zur Durchführung konjugierter Gradientenminimierung sind wohlbekannt und in dem genannten

Text von Press et al., dort insbesondere auf den Seiten 305-306, beschrieben.

Nach Auswahl der speziellen Knotenpositionen, die das Minimum der Spannungsenergie H für ein Modell als Ganzes ergeben, ist die nächste Stufe die Berechnung der mit jeder Bindung assoziierten Spannungsenergie gemäß der obigen Formel XII. Diese berechneten individuellen Bindungsenergien h_{Bindung} werden dann individuell gegen die passende Kohäsionsenergie für die spezielle Bindung getestet. Das heißt, daß die Bindungsenergie für jede Matrixbindung 32a mit der Kohäsionsenergie U_m der Matrix verglichen wird, wohingegen die Spannungsenergie der Faserbindung mit der Kohäsionsenergie U_f der Faser verglichen wird. Wenn die mit einer beliebigen Bindung assoziierten Spannungsenergie die mit dieser Bindung assoziierte Kohäsionsenergie überschreitet, wird diese spezielle Bindung als gebrochen angesehen.

Diese Stufe des Verfahrens ist direkt mit einem signifikanten Merkmal des Modells verknüpft. Weil die Formeln für die Gesamtspannungsenergie und insbesondere die Formel für Spannungsenergie, die mit einer speziellen Bindung assoziiert ist, Terme enthalten, die sowohl Zug- als auch Scherbeanspruchungen wiedergeben, gibt das Modell Bindungsbruch wieder, der als Resultat von kombinierten Zug- und Scherungswirkungen stattfindet. Wenn gefunden wird, daß eine Bindung in dieser Stufe des Modellverfahrens gebrochen ist, werden die das Modell definierenden Gleichungen korrigiert, um die gebrochene Bindung zu berücksichtigen. Das bedeutet, daß in nachfolgenden Berechnungen angenommen wird, daß die gebrochene Bindung einen Zugmodul von 0 und einen Schermodul von 0 hat, so daß in nachfolgenden Berechnungen angenommen wird, daß für Bindungen, die gebrochen sind, und für Winkel, die gebrochenen Bindungen benachbart sind, E_x beziehungsweise c gleich 0 sind. Anders gesagt wird die Struktur des Modells erneut eingestellt, um die gebrochenen Bindungen zu berücksichtigen. Nach einer solchen erneuten Einstellung kehrt das Modell zu der Stufe der Berechnung der speziellen Positionen der Knoten zurück, die die minimale Gesamtspannungsenergie H liefern. Es sei darauf hingewiesen, daß diese neuen Positionen sich

B 30.10.97

- 20 -

normalerweise von den Positionen unterscheiden, die das Minimum der Gesamtspannungsenergie liefern, wenn alle Bindungen intakt sind.

Nach erneuter Berechnung des Minimums werden die individuellen Bindungsenergien noch ein weiteres Mal für die neuen Knotenpositionen berechnet und ein weiteres Mal gegen die passenden Werte von U getestet, um auf weitere gebrochene Bindungen zu prüfen. Wenn weitere gebrochene Bindungen gefunden werden, wird das Verfahren erneut wiederholt, bis die Berechnung der Knotenverschiebung wie oben beschrieben keine weiteren gebrochenen Bindungen ergibt. Wenn dieser Zustand erst einmal erreicht ist (entweder bei der ersten Berechnung des Minimums der Spannungsenergie oder bei einer nachfolgenden Berechnung nach erneuter Einstellung der Modellgleichungen) wird das Ergebnis untersucht, um zu bestimmen, ob ein katastrophales Versagen stattgefunden hat, d. h. ob eine Reihe von gebrochenen Bindungen sich ganz über die Matrix erstreckt, oder nicht. Wenn nicht, wird die ursprünglich angenommene Deformation erhöht und die genannten Schritte werden erneut wiederholt.

Dieser Cyclus der Verfahrensschritte wird wiederholt, bis das Modell anzeigt, daß ein katastrophales Versagen stattgefunden hat. An diesem Punkt bestimmt das Modell aus den Identitäten der gebrochenen Bindungen den Versagensmodus, d. h. ob das Versagen in der Matrix allein oder sowohl in der Faser als auch in der Matrix stattgefunden hat. Nach Simulieren eines ersten katastrophalen Versagens erhöht oder vermindert das Modell dann die Faserlänge um einen festgesetzten Betrag, die eine feste Menge oder ein fester Prozentsatz der Faserlänge sein kann. Wenn das katastrophale Versagen, das mit der letzten verwendeten Faserlänge verwendet wurde, ein Versagen der Matrix allein war, erhöht das Modell die Faserlänge, wohingegen das Modell die Faserlänge verringert, wenn ein Versagen der Faser beobachtet wurde. Nach Erhöhen oder Verringern der Faserlänge wiederholt das Modell die oben diskutierten Arbeitsschritte, um ein weiteres katastrophales Versagen mit der neuen Faserlänge zu simulieren. Dieser Cyclus wird fortgesetzt, bis mindestens ein Faserversagen

und mindestens ein Versagen der Matrix allein simuliert worden sind. Die kritische Länge oder Grenze zwischen Nur-Matrix- und Faserversagen wird als Mittelweg zwischen der höchsten Faserlänge, die ein Versagen der Matrix allein ergibt, und der niedrigsten Faserlänge, die ein Versagen der Faser ergibt, genommen. Das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells ist gleich dieser kritischen Länge, geteilt durch den angenommenen Durchmesser der Faser. Da das spezielle Modell in Figur 4 einen Durchmesser der Faser von 1 annimmt, ist das kritische Aspektverhältnis gleich der kritischen Länge. Somit bestimmt das Modell für alle gegebenen Werte von E_f , E_m , U_f und U_m das kritische Aspektverhältnis.

Der Begriff "kritisches Aspektverhältnis des Knotenmodells" (symbolisiert als $S_{c,m}$) wie in dieser Offenbarung verwendet bedeutet das kritische Aspektverhältnis, das in dieser Weise unter Verwendung des oben beschriebenen Modells bestimmt wurde. Insbesondere ist das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells $S_{c,m}$ eine Funktion des Elastizitätsmodulverhältnisses E ($E = E_f/E_m$) und des Kohäsionsenergieverhältnisses U ($U = U_f/U_m$). Somit definieren die Elastizitätsmodule und Kohäsionsenergien von Faser und Matrix und insbesondere die Verhältnisse dieser Parameter das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells.

Das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells zeigt im wesentlichen das gleiche Variationsmuster mit U und E wie das oben diskutierte analytische kritische Aspektverhältnis. Das heißt, daß es für jeden gegebenen Wert von U einen speziellen Bereich von Elastizitätsmodulverhältnis E gibt, für den die kritische Länge auf einem Minimum ist. Das Variationsmuster für sowohl das analytische kritische Aspektverhältnis als auch das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells ist in Figur 6 für etliche Werte von U illustriert. In Figur 6 gibt der Wert S_c das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells $S_{c,m}$ wieder. Wie oben diskutiert ist der Wert für $S_{c,m}$ im wesentlichen der gleiche wie der für das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells angegebene Wert für den gleichen Wert von U und E , wenn die Werte von R_0 und R_1 , die zur Berechnung des analytischen kritischen

Aspektverhältnisses $S_{c,ana}$ verwendet werden, nach dem Knotenmodell geeicht sind.

Die Abhängigkeit des kritischen Aspektverhältnisses von U und E , die von dem Knotenmodell und den analytischen Verfahren wie oben diskutiert gefunden worden, liefern etliche hochsignifikante Ergebnisse, die erfindungsgemäß ausgenutzt werden können. Das Verhalten des analytischen kritischen Aspektverhältnis, wenn E variiert, ist signifikant. Es gibt abgegrenzte Minima in den Werten von $S_{c,ana}$ und $S_{c,m}$. Obwohl die tatsächlichen Werte von $S_{c,ana}$ und $S_{c,m}$ sich für unterschiedliche Werte von U unterscheiden, liegt das Minimum sowohl für $S_{c,ana}$ als auch für $S_{c,m}$ für vernünftige Werte von U (etwa 1 bis etwa 5) im Bereich von E bis etwa 10 bis etwa 20 und normalerweise etwa 13 bis etwa 18. Anders betrachtet zeigen die oben diskutierten Beziehungen, daß für Materialien mit erreichbaren Verhältnissen der Kohäsionsenergien die Faser und die Matrix wünschenswerterweise ein E_f/E_m zwischen etwa 10 und etwa 20 aufweisen, wünschenswerterweise zwischen etwa 13 und etwa 18 und besonders wünschenswert etwa 15, um so die niedrigsten kritischen Aspektverhältnisse zu liefern.

Die Werte für den Zugmodul der Faser (E_f) und den Zugmodul der Matrix (E_m), die zur Bestimmung von $S_{c,m}$ und $S_{c,ana}$ verwendet werden, können aus Standardeigenschaftensdaten genommen werden, die in bekannten Kompendien über Materialeigenschaftsdaten angegeben sind. Die Kohäsionsenergiewerte für die Faser U_f können in ähnlicher Weise aus Daten für Fasern mit etwa dem Durchmesser, der üblicherweise in Verbundwerkstoffen verwendet wird, genommen werden, basierend auf Tests solcher Fasern. Diese Daten sind üblicherweise verfügbar. Wenn Kohäsionsenergiewerte von Tests von Fasern abgeleitet sind, sind die Daten normalerweise nicht wesentlich von äußerlichen Faktoren beeinflusst, wie Defekten in den Proben, da typische Fasern eine sehr niedrige Konzentration jener Defekte aufweisen. Besonders Glasfasern haben normalerweise eine relativ niedrige Konzentration an Defekten und somit geben Kohäsionsenergiedaten für Glasfasern, die von gut durchgeführten Bruchtests der Fasern abgeleitet sind, normalerweise die

wahre Kohäsionsenergie der Fasern wieder. Allerdings haben großvolumige Proben von Matrixmaterialien in den Mengen, die üblicherweise zur technischen Durchführung von Eigenschaftstests für physikalische Daten mit solchen Materialien verwendet werden, üblicherweise eine wesentliche Anzahl von Defekten. Von Tests mit solchen Proben abgeleitete Kohäsionsenergiwerte geben typischerweise eine viel niedrigere Kohäsionsenergie wieder als die, die erreicht würde, wenn eine im wesentlichen fehlerfreie (defektfreie) Probe untersucht würde. Wenn ein fehlerbeeinflusster Wert von U_m zusammen mit einem im wesentlichen fehlerfreien Wert für U_f verwendet würde, würde der resultierende Wert von U nicht das wahre Verhältnis der Kohäsionsenergien von der Faser und dem Matrixmaterial wiedergeben. Ein "wahrer" oder nicht von Defekten beeinflusster Wert von U_m könnte abgeleitet werden, indem Proben des Matrixmaterials im Mikromaßstab mit Abmessungen ähnlich denen der Fasern gefertigt würden und die Proben physikalisch untersucht würden.

Ein wahrer Wert für das Kohäsionsenergieverhältnis für eine beliebige Kombination aus Fasermaterial und Matrixmaterial und somit ein wahrer Wert von U_m für das Matrixmaterial kann auch durch physikalisches Untersuchen von verdünnten Einzelfaserverbundwerkstoffen abgeleitet werden, die das in Frage kommende Matrixmaterial mit beliebigem Fasermaterial mit bekanntem U_f verbauen. Die physikalischen Tests etablieren ein kritisches Aspektverhältnis für das System einschließlich des Matrixmaterials und des bekannten Fasermaterials. Das kritische Aspektverhältnis zusammen mit den bekannten Werten von E_f und U_m und Werten von $S_{c,m}$ für verschiedene Kombinationen von E und U können verwendet werden, um den geeigneten Wert von U zu bestimmen. Dieser Wert kann wiederum zusammen mit dem bekannten Wert von U_f zur Bestimmung von U_m für das Matrixmaterial verwendet werden.

Beispielsweise haben Kohlefasern ein E_f von 250 GPa und U_f von 0,0405 GPa, wohingegen E_m für ein reines Epoxyharzmatrixmaterial 2,7 GPa beträgt. Somit ist E für das Epoxymatrix/Kohlefasersystem 250/2,7 oder ungefähr 92,6. Physikalische Tests zeigen, daß S_c für dieses System ungefähr 62 beträgt. Die Verwendung

dieser Werte mit den in den Kurven von Figur 6 gezeigten Werten zeigt, daß das Kohäsionsenergieverhältnis U für dieses System etwa 1,5 beträgt. Das heißt, daß ein System mit E von etwa 92,6 und S_c von etwa 62 auf der Kurve für $U = 1,5$ liegt. Somit ist $1,5 = U_{\text{Kohlenstofffasern}}/U_{\text{Epoxy matrix}}$. Das Ersetzen des bekannten Werts von $U_{\text{Kohlenstofffasern}}$ ergibt $U_{\text{Epoxy matrix}} = 0,027$ GPa. Dieser Wert von U_m kann verwendet werden, um unter Verwendung der analytischen Gleichungen oder des Knotenmodells wie oben diskutiert mit Kohlefasern oder mit anderen Fasern S_c zu bestimmen.

Die genannten Ergebnisse liefern auch eine Richtlinie zum Modifizieren von Verbundwerkstoffen.

Tabelle I

Faser/Polymer-Modulverhältnisse für Glas- und Kohlefasern mit typischen thermoplastischen und wärmehärtbaren Polymeren, die in Verbundwerkstoffen verwendet werden

	E_m (GPa)	$E (= E_f/E_m)$ Glas ($E_f = 75$ GPa)	$E (= E_f/E_m)$ Kohle ($E_f = 250$ GPa)
Thermoplasten			
PMMA	2,7	28	92
Polycarbonat	2,3	33	106
Polystyrol	2,7	28	92
wärmehärtbare Polymere			
Polyester	2,0	38	125
Vinylester	2,4	31	104
Epoxy	2,7	28	92

Wie in Tabelle 1 gezeigt beinhalten die typischen vor der vorliegenden Erfindung eingesetzten Verbundwerkstoffe Fasern wie Fiberglas oder Kohlenstoff in einer Polymermatrix mit intrinsischen Eigenschaften, die hohe kritische Aspektverhältnisse ergaben. Beispielsweise ist das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells für einen Verbundwerkstoff, der Kohlefasern ($E_f = 250$ GPa, $U_f = 0,091$ GPa) in einer Epoxy matrix ($E_m = 2,7$ GPa, $U_m = 0,027$ GPa) einschließt, etwa 62. Wie jedoch in Figur 6 ersichtlich, haben theoretische Verbundwerkstoffe mit anderen Werten von E und/oder U niedrigere kritische Aspektverhältnisse. Für Systeme

mit $U=1,5$ ist der Minimumwert von S_c etwa 11 bis 12 und tritt bei etwa $E=10$ bis $E=15$ auf. Anders betrachtet ist das Epoxymatrix/-Kohlefaser-System hinsichtlich des kritischen Aspektverhältnisses nicht optimiert. Mit der gleichen reinen Epoxyharzmatrix, aber mit Glasfasern, für die $E_f=250$ GPa und $U_f=0,091$ GPa, ist E etwa 28, wohingegen U etwa 3,3 beträgt. Das kritische Aspektverhältnis beträgt etwa 82. Allerdings ist das Minimum von $S_{c,m}$ für Verbundwerkstoffe mit $U=3,3$ weniger als 50 und tritt bei E =etwa 11 bis 15 auf. Die entsprechenden Werte für andere ähnliche Verbundwerkstoffe unter Verwendung anderer Polymermatrizes sind in ähnlicher Weise von den minimalen erreichbaren Werte von $S_{c,m}$ weit entfernt.

Gemäß weiteren Aspekten der vorliegenden Erfindung kann der Verbundwerkstoff physikalische Mittel zum Modifizieren der Eigenschaften der Faser oder der Matrix oder von beidem einbeziehen, so daß die Faser, die Matrix oder beide scheinbare Eigenschaften zeigen, die sich von den intrinsischen Eigenschaften des reinen, massiven Fasermaterials und des reinen, massiven Matrixmaterials unterscheiden. Diese Modifikation wird so gewählt, daß das kritische Aspektverhältnis, das durch die scheinbaren Eigenschaften der Faser und der Matrix definiert ist, niedriger als das kritische Aspektverhältnis ist, das durch die intrinsischen Eigenschaften des Fasermaterials und des Matrixmaterials selbst definiert ist. Anders gesagt können die in die Faser oder die Matrix eingebauten physikalischen Mittel die Weise, in der sich diese Materialien verhalten, so verändern, daß sie sich verhalten, als hätten sie physikalische Eigenschaften, die sich von denen der reinen massiven Materialien unterscheiden. Diese anderen physikalischen Eigenschaften führen zu einem niedrigeren kritischen Aspektverhältnis. Ein hypothetischer Verbundwerkstoff, der verschiedene physikalische Mittel einbezieht, die verwendet werden können, um dies zu bewirken, ist in Figur 7 illustriert. Eine Faser 40 ist aus einem Fasermaterial gebildet, das einen intrinsischen Zugmodul $E_{f,int}$ aufweist. Faser 40 ist hohl und hat eine Innenbohrung 42. Faser 40 hat eine niedrigere Federkonstante als eine massive Feder aus dem gleichen Material.

Somit wirkt die Faser in der gleichen Weise wie eine massive Faser, die aus einem Material mit einem niedrigeren Wert von E_f gebildet ist. Dieser niedrigere Wert von E_f -- der Wert für E_f , der erforderlich ist, um eine massive zylindrische Faser mit dem gleichen Außendurchmesser d und der gleichen Zugfederkonstante wie Faser 40 zu schaffen -- wird hier als scheinbarer Elastizitätsmodul $E_{f,app}$ von Faser 40 bezeichnet. Anders ausgedrückt, die Faser 40 verhält sich so, als ob sie eine massive Faser wäre, die aus Material mit einem scheinbaren Elastizitätsmodul $E_{f,app}$ gebildet ist. Somit modifiziert Bohrung 42 den scheinbaren Elastizitätsmodul von Faser 40 und vermindert ihn effektiv auf einen scheinbaren Wert $E_{f,app}'$, der unter dem intrinsischen Elastizitätsmodul $E_{f,int}$ des die Faser bildenden Materials liegt. Eine andere Faser 44 schließt einen Kern aus Material mit niedrigem Modul ein, das effektiv den intrinsischen Elastizitätsmodul des Faser 44 bildenden Materials vermindert. Eine weitere Faser 48 weist gekrümmte Abschnitte auf, die die Steifheit der Faser bei Zug wesentlich vermindern und somit den scheinbaren Elastizitätsmodul der Faser wesentlich vermindern. Andere Faserkonfigurationen können zur Verminderung des scheinbaren Elastizitätsmoduls des Fasermaterials verwendet werden. Beispielsweise kann die Faser mit Hohlräumen oder dergleichen gebildet sein.

Die Matrix kann auch modifiziert sein, so daß sie einen Elastizitätsmodul zeigt, der sich von dem intrinsischen Elastizitätsmodul des Matrixmaterials selbst unterscheidet. Beispielsweise können kleine Teilchen aus einem Füllstoff mit hohem Modul 50, wie Teilchen im Mikromaßstab mit Durchmessern von deutlich unter dem Faserdurchmesser, in das Matrixmaterial 52 eingebaut sein, wodurch der scheinbare Elastizitätsmodul der Matrix erhöht wird. Wie aus der Betrachtung von Tabelle 1 und Figur 6 deutlich wird, ist es im Fall des Verbundwerkstoffs, der Fasern wie Glas oder Kohlenstoff in eine organische Matrix wie ein thermoplastisches oder wärmehärtbares Polymer einbaut, im allgemeinen erwünscht, den Elastizitätsmodul der Fasern zu verringern und den Elastizitätsmodul der Matrix zu erhöhen. In anderen Verbundwerkstoffen, bei denen das Elastizitätsmodulverhältnis E auf der un-

teren Seite des Minimumbereichs liegt, können die ungekehrten Modifikationen erwünscht sein. Es sei darauf hingewiesen, daß diese Modifikationen, die den scheinbaren Elastizitätsmodul der Faser oder der Matrix verändern, auch die scheinbare Kohäsionsenergie von einer oder beiden Komponenten verändern können. Der resultierende Satz der scheinbaren Eigenschaften ($E_{f,app}$; $E_{m,app}$; $U_{f,app}$ und $U_{m,app}$) soll in kooperativer Weise ein scheinbares kritisches Aspektverhältnis des Knotenmodells $S_{c,mm,app}$ definieren, das niedriger als das intrinsische kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells $S_{c,mm,int}$ ist, das durch die intrinsischen Eigenschaften der reinen Faser und Matrixmaterialien selbst definiert ist. Wie bereits gesagt können $S_{c,mm,int}$ und $S_{c,mm,app}$ entweder durch Arbeit des Modells oder durch Verwendung der analytischen Gleichungen bestimmt werden.

Bestimmte Aspekte der Erfindung können natürlich implimentiert werden, ohne die Berechnungen wirklich durchzuführen. Beispielsweise können die geeigneten Modifikationen selbst ohne die Berechnungen verwendet werden, vorausgesetzt, daß die Modifikationen tatsächlich zu der korrekten Modifizierung der Materialien selbst führen. Berechnungen und Modelle wie oben diskutiert können verwendet werden, um zu bestimmen, ob eine spezielle Modifikation erfolgreich oder wünschenswert wäre.

Die oben diskutierten analytischen Gleichungen und Knotenmodelle können direkt in Konstruktion und Herstellung von Verbundwerkstoffen ausgenutzt werden, die aus Fasern und Matrix mit speziellen scheinbaren Eigenschaften gebildet sind. Dieses Verfahren der Verbundwerkstoffherstellung schließt die Berechnung des kritischen Aspektverhältnisses durch Verwendung von jenen analytischen Gleichungen und/oder des Knotenmodells ein, mit Auswahl von scheinbaren Eigenschaften von echter Faser und Matrix und echter Faserlänge, um eine echte Faserlänge bereitzustellen, die größer als die vorhergesagte kritische Faserlänge ist, die durch die analytischen Gleichungen oder das Knotenmodell bestimmt wurde. Die gewählten Fasern und die gewählte Matrix werden dann in einen echten Verbundwerkstoff durch konven-

tionelle Verbundwerkstofffertigungstechniken wie Formung oder Auflageverfahren eingebaut.

Die oben diskutierten analytischen kritischen Aspektverhältnisse und kritischen Aspektverhältnisse aus dem Knotenmodell wurden unter Verwendung der Annahme eines verdünnten Verbundwerkstoffs abgeleitet. Das tatsächliche kritische Aspektverhältnis für einen konzentrierten Multifaserverbundwerkstoff wird in bester Näherung durch das kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells, multipliziert mit einem Skalierungsfaktor, typischerweise etwa 24, erreicht. Somit ist das Aspektverhältnis der echten Fasern in einem konzentrierten Verbundwerkstoff wünschenswerterweise etwa 24 ($S_{c,m}$) oder mehr, um sicherzustellen, daß die Fasern in effizienter Weise genutzt werden. Vorzugsweise ist das echte Faseraspektverhältnis weniger als etwa 30 ($S_{c,m}$). In dieser Hinsicht ist zu beachten, daß die Werte für E und U, die ein Minimum des kritischen Aspektverhältnisses für die verdünnten Fälle liefern, auch im konzentrierten Fall funktionieren sollten. Das heißt, daß physikalische Eigenschaften, die ein Minimum von S_c in den oben genannten verdünnten Fällen liefern, auch in konzentrierten Verbundwerkstoffen einen Minimumwert von S_c liefern sollten.

Das oben diskutierte Knotenmodell kann modifiziert werden, um etlichen der in dem bevorzugten Knotenmodell illustrierten Annahmen zu entsagen. Beispielsweise kann das Knotenmodell modifiziert werden, um einen konzentrierten Multifaserverbundwerkstoff enger angenähert zu simulieren, wie durch Einbringung von mehr Knoten, die mehr Fasern wiedergeben. Dies führt jedoch zu einer erheblichen Erhöhung der Rechenzeit, die zur Implimentierung des Modells erforderlich ist. Das Knotenmodell kann auch modifiziert werden, um zusätzliche Phasen einzubauen, wie eine Zwischenphase (Interphase) zwischen der Matrix und der Faser, wobei die Interphase Eigenschaften hat, die sich von der Matrix oder der Faser unterscheiden. In diesem Fall würden Bindungen und Winkel in dem Modell, die Bereiche des Verbundwerkstoffs simulieren, die von der Interphase beansprucht werden, passende Werte für E_i und c in Formel XI und XII zugewiesen. Die in Figur

B 30.10.97

- 29 -

4 illustrierte spezielle geometrische Anordnung der Knoten ist auch bevorzugt, aber nicht unabdingbar. Somit können andere mathematisch gleichwertige Anordnungen verwendet werden. Für alle solche anderen Konfigurationen gibt es eine Formel entsprechend Formel XII, aber mit unterschiedlicher Form. Obwohl die bevorzugten Modelle in einem Digitalcomputer implimentiert sind, können andere Modellbildungstechniken verwendet werden.

EP 92308169.9

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Herstellung eines Verbundmaterials, das eine in eine Matrix eingebante Faser umfaßt, wobei das kritische Aspektverhältnis von Durchmesser d und Länge L der Faser bestimmt wird, indem
 - (i) ein Knotenmodell des Verbundmaterials definiert wird, wobei das Modell eine Vielzahl von einander beabstandeten imaginären Knoten 30 umfaßt, die durch eine Vielzahl von imaginären Bindungen 32 miteinander verbunden sind, wobei ein erster Teil der Knoten 30a Punkte in der Matrix wiedergibt und ein zweiter Teil der Knoten 30b Punkte in der Faser wiedergibt, wobei die Bindungen 32a, die einen Matrixknoten 30a mit irgendeinem anderen Matrixknoten 30a oder einem Faserknoten 30b verbindet, eine anzeigende Darstellung des Elastizitätsmoduls der Matrix sind, und die Bindungen 32b, die einen Faserknoten 30b mit einem anderen Faserknoten 30b verbinden, eine anzeigende Darstellung für den Elastizitätsmodul der Faser sind, und die Winkel H zwischen den Bindungen 32 eine anzeigende Darstellung der Scherspannung der Matrix sind;
 - (ii) eine imaginäre Verformung auf das Verbundmodell ausgeübt wird, um einen Teil der Knoten relativ zu den verbleibenden Knoten zu verschieben;
 - (iii) die verbleibenden Knoten erneut angeordnet werden, um die niedrigste Gesamtspannungsenergie H des Verbundmodells gemäß der Formel

$$H = \frac{1}{2} E_a \sum_{ij} (r_{ij} - r_0)^2 + \frac{1}{2} c \sum_{ijk} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2$$

zu ergeben, in der i, j alle der verschiedenen Bindungen bezeichnen; i, j, k alle der Winkel bezeichnen; r die Bindungslänge oder den Abstand r zwischen jedem Paar von benachbarten Knoten i und j wiedergibt; E_a den Elastizitätsmodul der Matrix E_a für i, j , die eine Matrixbindung 32a bezeichnen, wiedergibt; wobei E_f der Elastizitätsmodul der Faser, E_f für i, j , die eine Faserbindung 32b bezeichnen, ist; r_0 die Ausgangslänge der verschiedenen Bindungen wiedergibt, wobei alle als gleich angenommen werden; θ_{ijk} einen beliebigen der Bindungswinkel wiedergibt, H_0 den Ausgangswert dieses Winkels wiedergibt und c eine Torsionsfederkonstante wiedergibt;

(iv) die individuelle Spannungsenergie, h_{Bindung} , für jede Bindung 32 gemäß der Formel

$$h_{\text{Bindung}} = \frac{1}{2} E_a (r - r_0)^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} c \sum_{ijk=\text{Nachbarn}} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2 \right]$$

berechnet wird, wobei der Ausdruck $ijk = \text{Nachbarn}$ anzeigt, daß die Aufsummierung über solche Winkel H erfolgt, die der Bindung benachbart sind, für die die individuelle Bindungsenergie berechnet wird, und die verbleibenden Symbole wie oben definiert sind;

(v) die berechnete individuelle Bindungsspannungsenergie mit der Kohäsionsfestigkeit der Matrix oder Faser, wie es zweckmäßig ist, verglichen wird und die Bindung als imaginär zerbrochen angesehen wird, wenn die individuelle Bindungsspannungsenergie die Kohäsionsfestigkeit übersteigt;

- (vi) die obigen Schritte (ii) bis (vi) wiederholt werden und die Länge L der Faser eingestellt wird, bis ein imaginäres katastrophales Versagen der Matrix allein und Versagen der Faser des Verbundmodells stattgefunden haben;
 - (vii) die höchste Faserlänge bestimmt wird, die ein Versagen der Matrix allein ergibt, und die niedrigste Länge der Faser bestimmt wird, die ein Versagen der Faser ergibt, und das kritische Aspektverhältnis der Faser als annähernder Mittelpunkt dieser höchsten und niedrigsten Faserlängen, geteilt durch den angenommenen Durchmesser d der Faser, berechnet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Ausgangswert des Bindungswinkels, θ_0 , mit 60° angenommen wird.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Torsionsfederkonstante, c , mit $E_m/10$ angenommen wird, wobei E_m wie in Anspruch 1 definiert ist.
 4. Verbundwerkstoff mit diskontinuierlichen Fasern, der Fasern mit endlicher Länge umfaßt, die aus einem Fasermaterial mit einem intrinsischen Elastizitätsmodul $E_{f, \text{int}}$ und intrinsischer Kohäsionsenergie $U_{f, \text{int}}$ gebildet sind, die in einer Matrix aus einem Matrixmaterial mit einem intrinsischen Elastizitätsmodul $E_{m, \text{int}}$ und einer intrinsischen Kohäsionsenergie $U_{m, \text{int}}$ eingebettet sind, wobei die intrinsischen Eigenschaften die Eigenschaften der reinen festen Faser beziehungsweise der reinen festen Matrixmaterialien sind, wobei die intrinsischen Elastizitätsmodule und Kohäsionsenergien der Materialien ein intrinsisches kritisches Aspektverhältnis $S_{c, \text{mm, int}}$ des Knotenmodells definieren, wobei der Wert des kritischen Aspektverhältnisses des Knotenmodells durch Anwendung des Verfahrens nach Anspruch 1 erhalten wird, wobei die Fasern einen scheinbaren Elastizitätsmodul $E_{f, \text{app}}$ und

eine scheinbare Kohäsionsenergie $U_{f,app}$ aufweisen, die Matrix einen scheinbaren Elastizitätsmodul $E_{m,app}$ und scheinbare Kohäsionsenergie $U_{m,app}$ aufweist, wobei die scheinbaren Eigenschaften die Eigenschaften sind, die die Faser und die Matrix in der in dem Verbundwerkstoff vorhandenen Form zeigen, wobei die scheinbaren Elastizitätsmodule und scheinbaren Kohäsionsenergien ein kritisches Aspektverhältnis $S_{c,m,app}$ des scheinbaren Knotenmodells definieren, wobei mindestens einer aus der Matrix und den Fasern physikalische Mittel zur Einstellung von mindestens einem aus seinem scheinbaren Elastizitätsmodul und seiner Kohäsionsenergie auf einen Wert, der von dem entsprechenden intrinsischen Wert verschieden ist, einbringt, so daß $S_{c,m,app}$ kleiner ist als $S_{c,m,int}$.

5. Verbundwerkstoff nach Anspruch 4, bei dem $E_{f,int}$ größer als $E_{m,int}$ ist und das physikalische Mittel Mittel zur Einstellung von $E_{m,app}$ auf einen höheren Wert als $E_{m,int}$ einschließt.
6. Verbundwerkstoff nach Anspruch 5, bei dem das Mittel zur Einstellung von $E_{m,app}$ einen teilchenförmigen Füllstoff einschließt, der in der Matrix dispergiert ist.
7. Verbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 4 bis 6, bei dem $E_{f,int}$ größer als $E_{m,int}$ ist und das physikalische Mittel Mittel zur Einstellung von $E_{f,app}$ einschließt, so daß $E_{f,app}$ kleiner als $E_{f,int}$ ist.
8. Verbundwerkstoff nach Anspruch 7, bei dem die Fasern von massiven zylindrischen Stäben verschiedene Formen (Gestalten) haben, die physikalischen Mittel die Formen der Fasern einschließen und die Formen so sind, daß $E_{f,app}$ kleiner ist als $E_{f,int}$.
9. Verbundwerkstoff nach Anspruch 8, bei dem die Fasern hohl sind.

10. Verbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 4 bis 9, bei dem das Matrixmaterial ein organisches Material ist und das Fasermaterial ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Kohle und Glas.
11. Verbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 4 bis 10, bei dem das scheinbare kritische Aspektverhältnis des Knotenmodells $S_{c,mm,app}$ weniger als etwa 25 beträgt.
12. Verbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 4 bis 11, bei dem $E_{f,app}/E_{m,app}$ etwa 10 bis etwa 20 beträgt.
13. Verbundwerkstoff nach Anspruch 12, bei dem $E_{f,app}/E_{m,app}$ etwa 13 bis 18 beträgt.
14. Verbundwerkstoff nach Anspruch 13, bei dem $E_{f,app}/E_{m,app}$ etwa 15 beträgt.
15. Verbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 12 bis 14, bei dem $E_{f,app}/E_{m,int}$ kleiner als $E_{f,int}/E_{m,int}$ ist.
16. Verbundwerkstoff nach Anspruch 15, bei dem das Fasermaterial ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Polyethern, Aramiden, metallischen Materialien und nicht-metallischen anorganischen Materialien, und das Matrixmaterial ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus organischen Polymeren.

92.308 164.4

^{1/6}
B 30 10 97

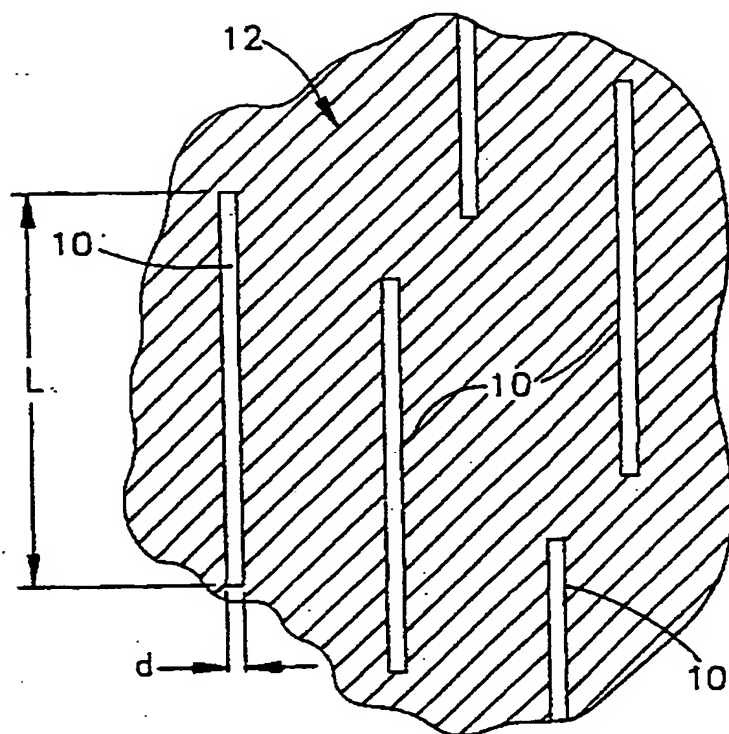


FIG. 1

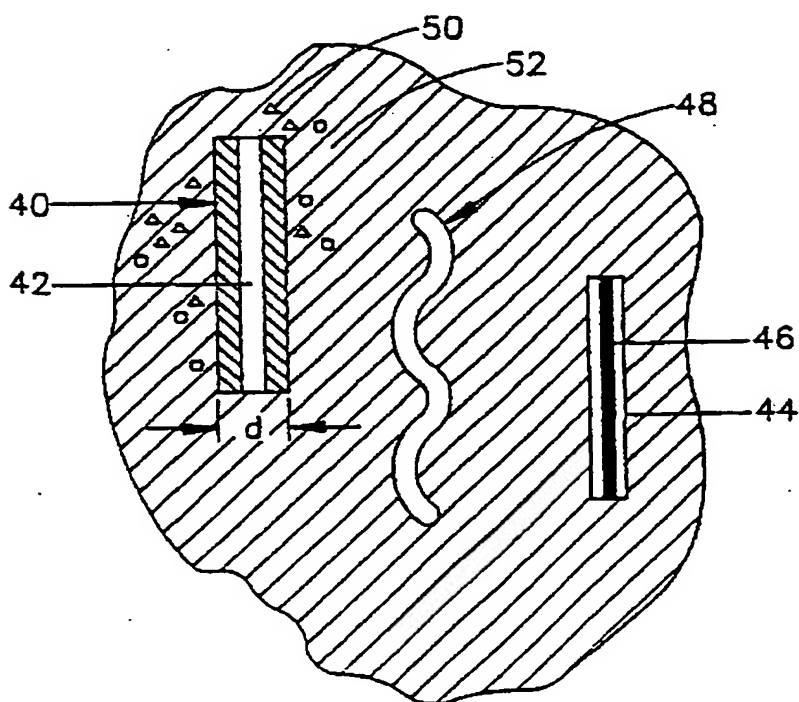


FIG. 7

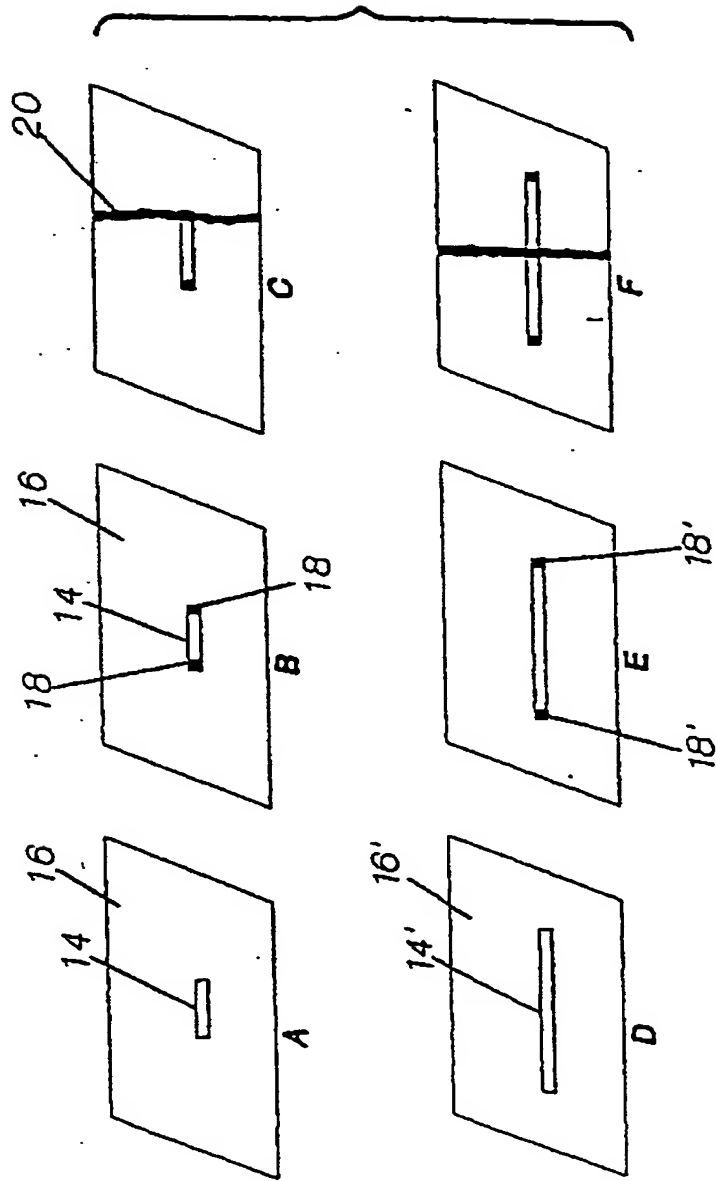


FIG. 2

3/6
B 30.10.97

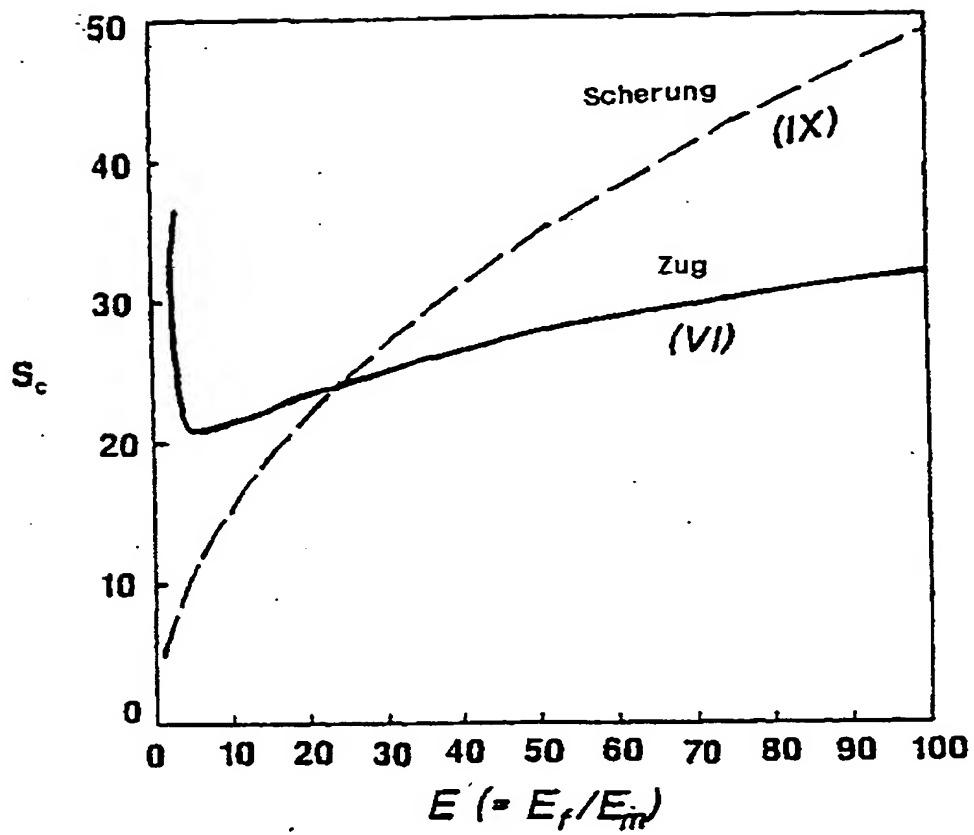


FIG. 3

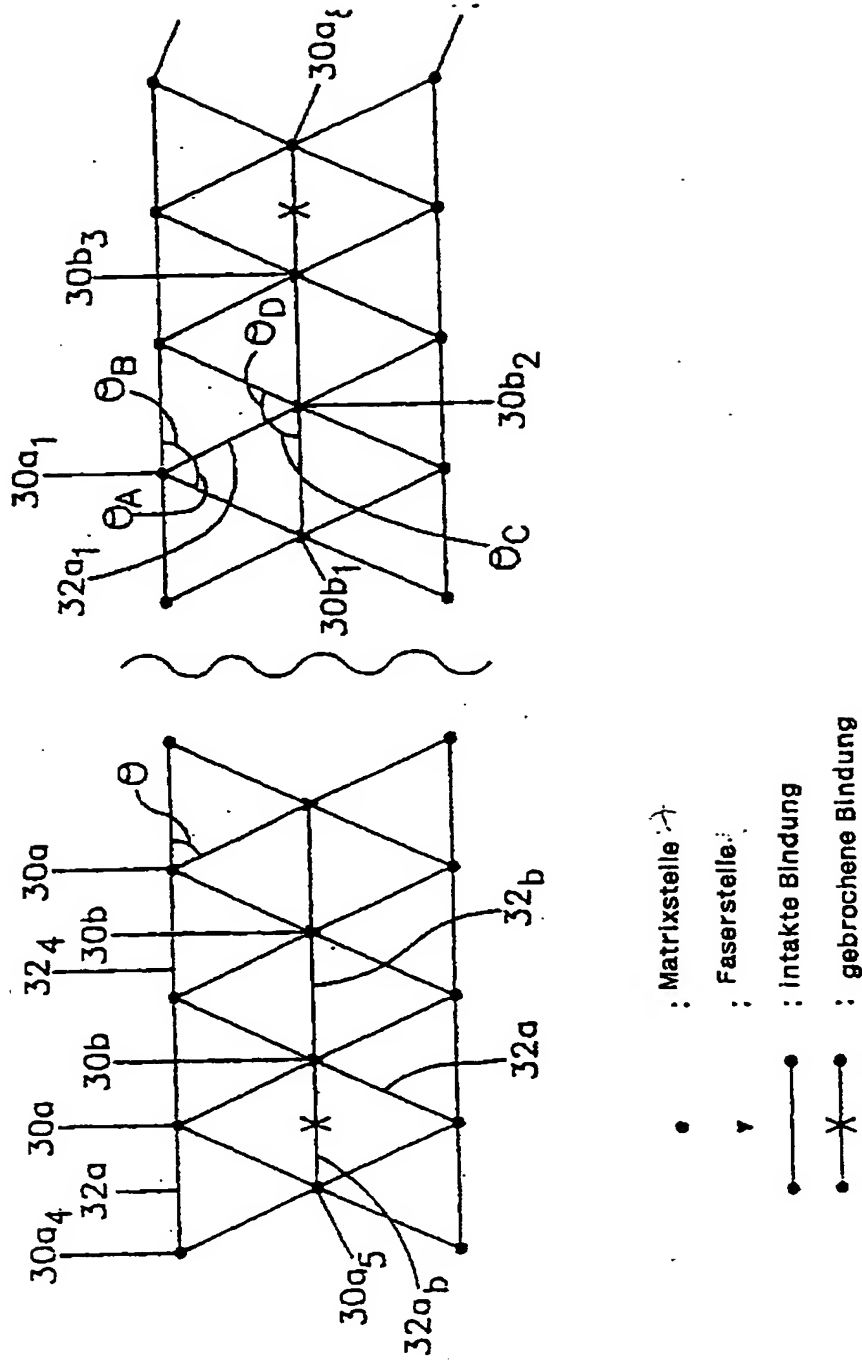


FIG. 4

5/6
8.30.10.97

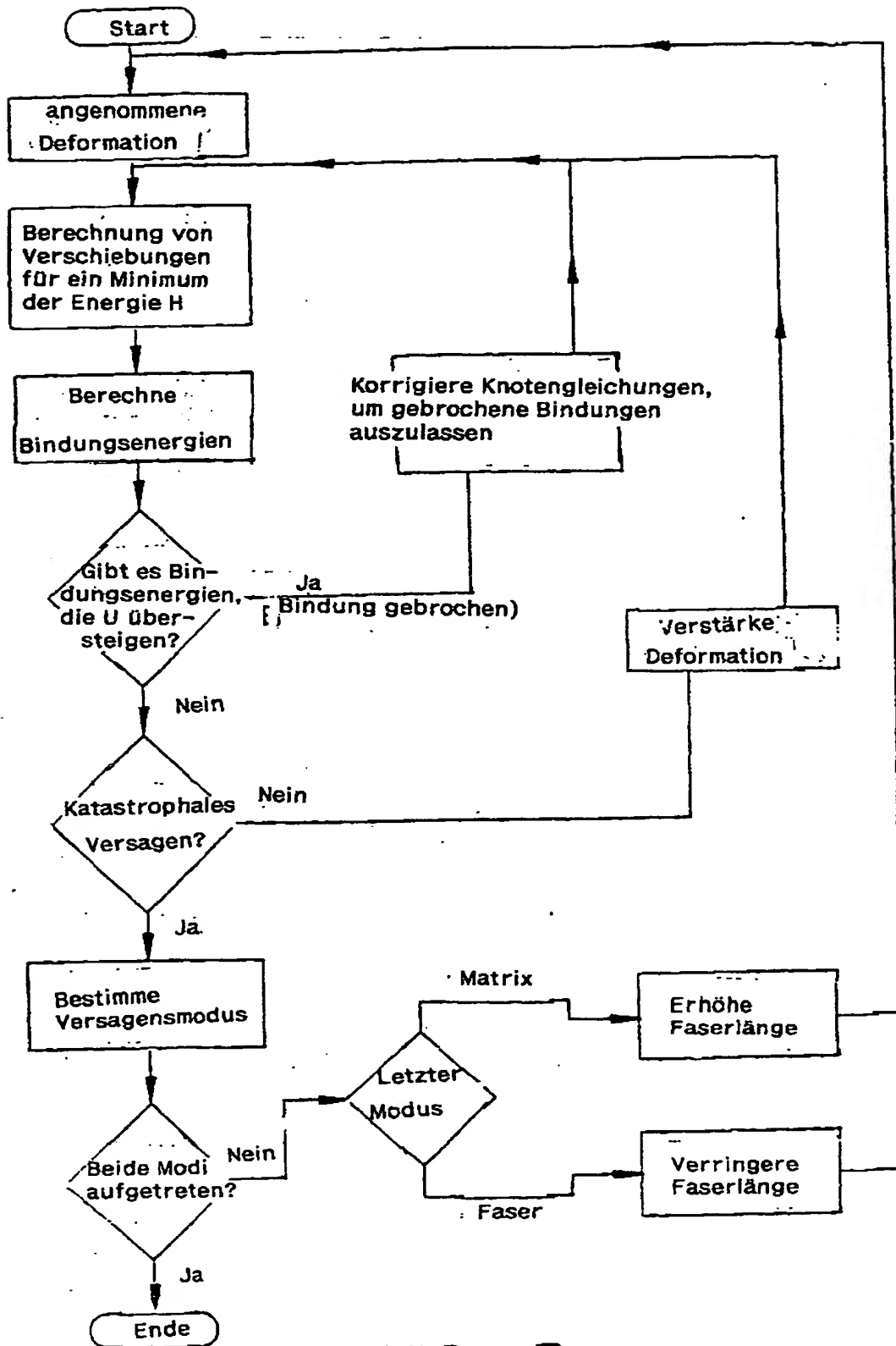


FIG. 5

6/6

B 30.10.97

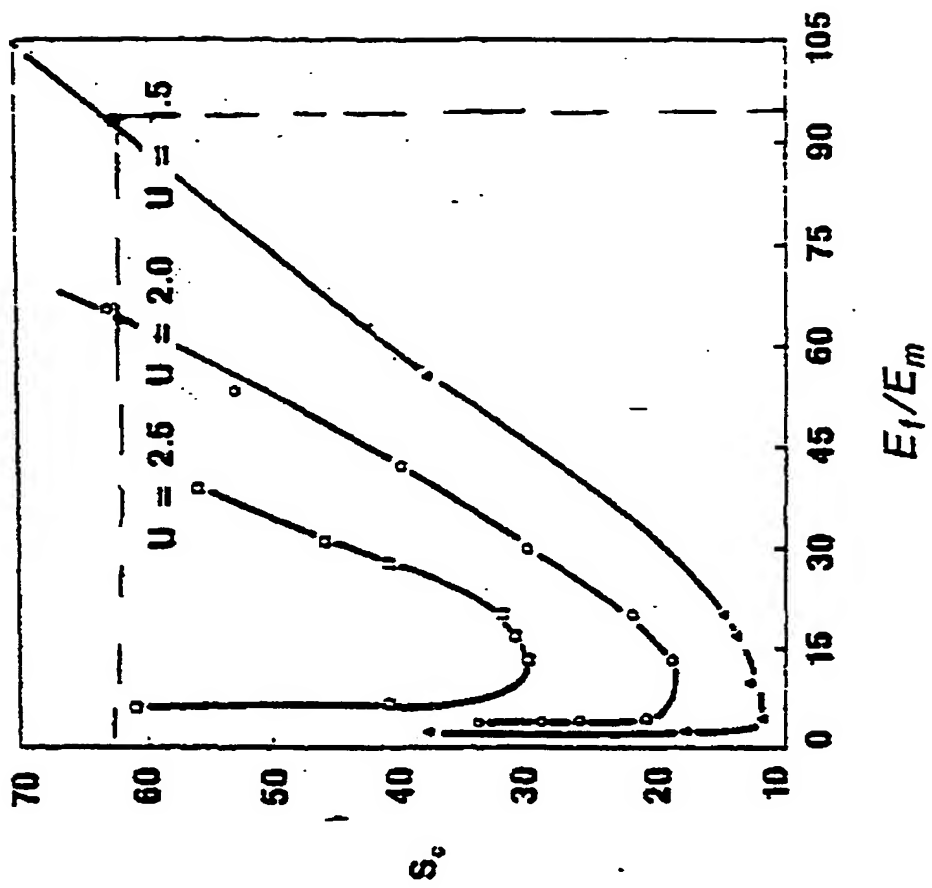


FIG. 6